

基于5G电力虚拟专网的秒级可中断负荷快速响应系统

袁胜利

国网冀北电力有限公司唐山供电公司

摘要：随着电力系统的复杂性和对可靠性要求的提高，传统的电力负荷管理策略已难以满足现代电网的需求。本文提出了一种基于5G电力虚拟专网的秒级可中断负荷快速响应系统。该系统利用5G网络的高带宽、低延迟特性，结合先进的负荷控制算法和智能设备，实现了对电网负荷的实时监控和快速调整。通过在电网中部署一系列可中断负荷控制节点，系统能够在电网出现瞬时过载或紧急情况下，迅速中断部分负荷，以维持电网的稳定运行。本文详细介绍了系统的架构设计、关键技术实现以及仿真测试结果。

关键词：5G电力虚拟专网；可中断负荷；快速响应系统；电网稳定性；智能电网

【DOI】10.12252/j.issn.2096-6288.2022.12.047

一、引言

随着全球能源结构的转型和智能电网技术的快速发展，电力系统的运行面临着前所未有的挑战。分布式能源资源（DER）的大规模接入、电动汽车（EV）的普及以及电力需求的波动性增加，都对电网的稳定性和可靠性提出了更高要求。传统的电力负荷管理策略往往响应速度慢，难以适应这些新变化。因此，研究一种能够快速响应电网需求变化的负荷控制策略显得尤为重要。

二、系统架构设计

（一）5G通信网络：高速信息传输的基石

5G通信网络作为整个系统的核心，其高速信息传输的能力是实现秒级可中断负荷快速响应系统的关键。这种网络不仅能够支持大量设备的同时连接，而且能够提供几乎无延迟的数据传输，这对于实时监控电网状态和执行控制指令至关重要。5G网络的这些特性使得智能负荷控制中心能够迅速接收到电网的实时数据，同时将控制指令发送到用户端的智能设备，确保了整个系统的响应速度。

在电力系统中，5G网络的高带宽和低延迟特性使得电网监控和控制应用能够获得所需的带宽和服务质量。这种网络切片技术的应用，允许将一个物理网络分割成多个虚拟网络，每个切片都能够根据特定的服务需求进行定制。这意味着可以为电力监控和控制应用创建专用的网络切片，确保这些应用能够获得所需的带宽和服务质量。这种定制化的网络服务能够为电力监控和控制提供专属的通信通道，避免网络拥堵，确保关键数据和指令的传输不受其他网络活动的影响。

边缘计算的部署也是优化5G网络的重要措施。通过在网络边缘部署计算资源，可以显著减少数据传输的延迟。在电力系统中，这意味着控制指令和电网状态信息

可以在离用户更近的地方进行处理，从而加快决策和响应速度。边缘计算使得数据处理和分析更加接近数据源，减少了数据在网络中的传输距离，这对于实时监控和快速响应电网状态变化至关重要。

这些优化措施共同确保了5G网络能够为电力系统提供稳定、快速的信息传输服务。通过这些技术的应用，电力系统能够实现对电网状态的实时监控，并在紧急情况下迅速作出反应。例如，当电网出现瞬时过载时，系统能够立即检测到异常，并通过专用网络切片快速传递控制指令，边缘计算节点则迅速处理这些指令，实现对负荷的快速调整。这种高效的通信和计算能力为实时负荷控制提供了坚实的基础，有助于维护电网的稳定运行，提高电力系统的可靠性和效率。

（二）智能负荷控制中心：电网状态的监控者和策略生成者

智能负荷控制中心在电力系统中扮演着至关重要的角色，它不仅是电网状态的监控者，也是策略生成者。这个中心负责从电网的各个节点收集关键数据，包括但不限于电力的供需状况、电网的负载分布等。这些数据对于理解电网的实时运行状态至关重要，因为它们能够反映出电网的健康状况和潜在的过载风险。

通过对收集到的数据进行实时分析，智能负荷控制中心能够准确地判断电网的运行状态。这种分析能力使得控制中心能够预测可能出现的过载情况，并据此制定出相应的负荷控制策略。这些策略的目标是通过调整用户的用电模式来平衡电网的供需，从而防止过载的发生，确保电网的稳定运行。

在实际操作中，智能负荷控制中心会根据电网的实时状态，动态调整负荷控制策略。例如，在预测到某一区域可能会出现电力需求高峰时，控制中心可能会提前

通知该区域的用户，建议他们在非高峰时段使用电力，或者在必要时减少非关键负载的使用。这样的负荷调整策略有助于分散电力需求，减轻电网的负担，避免因过载而导致的停电或其他故障。

智能负荷控制中心还能够与用户端的智能设备进行通信，通过这些设备执行负荷控制策略。这种双向通信机制使得控制中心能够更精确地控制电网的负荷，同时也为用户提供了参与电网管理的机会，使他们能够通过调整自己的用电行为来帮助维护电网的稳定。

智能负荷控制中心的设计和运行，体现了现代电力系统管理的智能化和自动化趋势。通过这种先进的技术，电力系统能够更加灵活和高效地应对各种挑战，包括需求的波动、可再生能源的集成以及对环境影响的最小化。随着技术的不断进步和电力系统的不断发展，智能负荷控制中心将在确保电力供应安全和可靠性方面发挥越来越重要的作用。

（三）可中断负荷控制节点：执行命令的桥梁

可中断负荷控制节点在电力系统中扮演着执行命令的桥梁角色，它们是智能负荷控制中心与用户端智能设备之间的关键连接。这些节点的核心任务是接收控制中心发出的负荷控制指令，并将其转换为实际的电力供应中断操作。在设计这些节点时，必须充分考虑其可靠性和安全性，确保在执行中断电力供应的操作过程中，不会对用户的设备造成任何损害，同时也要保证中断操作的准确性和及时性。

为了实现这一目标，可中断负荷控制节点通常配备了先进的通信技术和数据处理能力，以确保指令的快速传递和执行。这些节点还需要具备高度的自适应能力，以便在电网状态发生变化时，能够迅速调整其操作策略。此外，节点的硬件设计也需要考虑到耐久性和抗干扰性，以适应各种复杂的电网环境。

在实际应用中，可中断负荷控制节点可能会面临各种挑战，例如网络延迟、通信故障或设备故障等。因此，这些节点还需要具备一定的容错能力和故障恢复机制，以确保在遇到问题时能够迅速恢复正常运行。通过这些设计，可中断负荷控制节点不仅能够高效地执行智能负荷控制中心的指令，还能够在电网紧急情况下发挥关键作用，为电力系统的稳定运行提供坚实的支持。

（四）用户端智能设备：用电模式的调整者

用户端的智能设备是系统的最后一环，它们根据可中断负荷控制节点的指令调整自身的用电模式。这些设

备可能包括智能插座、恒温器、电动汽车充电桩等，它们都能够根据电网的需求灵活地调整自身的电力消耗。通过这种方式，用户不仅能够参与到电网的负荷管理中，还能够在必要时为电网的稳定运行做出贡献。

三、关键技术实现

（一）5G通信网络的优化

为了确保电力系统在紧急情况下能够迅速响应，通信网络的可靠性和实时性至关重要。本研究针对5G网络进行了一系列的优化措施。

第一，网络切片技术的应用允许将一个物理网络分割成多个虚拟网络，每个切片都能够根据特定的服务需求进行定制。在电力系统中，这意味着可以为电力监控和控制应用创建专用的网络切片，确保这些应用能够获得所需的带宽和服务质量。这种定制化的网络服务能够为电力监控和控制提供专属的通信通道，避免网络拥堵，确保关键数据和指令的传输不受其他网络活动的影响。

第二，边缘计算的部署也是优化5G网络的重要措施。通过在网络边缘部署计算资源，可以显著减少数据传输的延迟。在电力系统中，这意味着控制指令和电网状态信息可以在离用户更近的地方进行处理，从而加快决策和响应速度。边缘计算使得数据处理和分析更加接近数据源，减少了数据在网络中的传输距离，这对于实时监控和快速响应电网状态变化至关重要。

这些优化措施共同确保了5G网络能够为电力系统提供稳定、快速的信息传输服务。通过这些技术的应用，电力系统能够实现对电网状态的实时监控，并在紧急情况下迅速作出反应。例如，当电网出现瞬时过载时，系统能够立即检测到异常，并通过专用网络切片快速传递控制指令，边缘计算节点则迅速处理这些指令，实现对负荷的快速调整。这种高效的通信和计算能力为实时负荷控制提供了坚实的基础，有助于维护电网的稳定运行，提高电力系统的可靠性和效率。

（二）负荷控制算法的开发

负荷控制是电力系统稳定运行的关键。本研究开发了一种基于模型预测控制（MPC）的负荷控制算法。

模型预测控制（MPC）：MPC是一种先进的控制策略，它使用模型来预测系统的未来状态，并基于这些预测来优化控制输入。在电力系统中，这意味着MPC算法可以根据电网的实时状态和未来的负荷预测来动态调整负荷中断策略。

动态调整策略：MPC算法能够根据电网的实际运行情况，实时调整负荷中断的策略。这种动态调整能力使得系统能够在不同的电网状态下提供最优的负荷控制方案，从而最大限度地减少负荷中断对用户的影响。

这种算法的开发为电力系统提供了一种智能化的负荷管理手段，提高了系统的自适应能力和响应速度。

（三）智能设备的集成与通信协议

智能设备的集成是实现电力系统秒级响应的关键。本研究设计了一套通信协议，以确保不同品牌和型号的智能设备能够无缝接入系统。

通信协议的设计：通信协议是设备之间交流信息的规则集。为了确保系统的兼容性和可扩展性，本研究开发了一套通用的通信协议。这套协议允许各种智能设备，无论其品牌或型号，都能够与系统进行通信，并按照统一的指令执行负荷控制。

无缝接入系统：通过这套通信协议，用户端的智能设备可以轻松地接入电力系统。这意味着用户可以根据自己的需求选择适合的智能设备，而无须担心设备之间的兼容性问题。

统一指令执行：统一的通信协议还确保了所有接入系统的智能设备能够按照统一的指令执行负荷控制。这种一致性对于实现系统的高效运行至关重要。

通过这些关键技术实现，本研究提出的秒级可中断负荷快速响应系统能够在电力系统面临紧急情况时迅速响应，确保电网的稳定运行。这些技术的集成和优化为电力系统的未来智能化和自动化提供了坚实的基础。

四、仿真测试与结果分析

（一）仿真模型构建

在仿真测试中，我们构建了一个包含多个节点的电网模型，这些节点代表了不同的电力用户和电网设备。模型中集成了5G通信网络，智能负荷控制中心，以及用户端的智能设备。我们模拟了多种电网运行场景，包括正常运行状态、瞬时过载和紧急情况。

（二）系统响应测试

在瞬时过载场景中，仿真结果显示，系统能够在1秒内识别出电网的过载状态，并迅速启动负荷中断策略。通过智能负荷控制中心的快速决策，系统能够在2秒内将控制指令发送到可中断负荷控制节点。这些节点随后在3秒内执行了负荷中断操作，有效地缓解了电网的负荷压力。

（三）用户用电模式调整

为了评估系统对用户用电模式的影响，我们特别关注了在负荷中断期间用户用电的变化。仿真数据表明，系统在执行负荷中断时，优先考虑了对电网影响最小的用户用电模式。例如，在紧急情况下，系统可能会选择中断非关键负载，如空调和热水器，而不是中断家庭照明或冰箱等基本用电需求。这种智能调整策略确保了用户的基本用电需求得到满足，同时减轻了电网的负担。

（四）电网稳定性分析

在紧急情况下，电网的稳定性是至关重要的。仿真测试显示，系统能够在电网瞬时过载的情况下，通过快速负荷中断，将电网的负载从95%降低到85%，这是一个安全且稳定的水平。这种快速响应能力对于防止电网崩溃具有重要意义。

（五）用户满意度评估

尽管负荷中断可能会对用户产生一定影响，但仿真结果显示，通过智能调整用户用电模式，系统能够将这种影响降至最低。例如，在一次紧急负荷中断中，用户的用电中断时间平均减少了30%。这种优化策略不仅提高了电网的稳定性，也提高了用户的满意度。

五、结论

本文提出的基于5G电力虚拟专网的秒级可中断负荷快速响应系统，为解决现代电网面临的稳定性挑战提供了一种新的解决方案。通过5G技术的集成和智能控制策略的应用，系统能够实现电网负荷的快速响应和精确控制。

参考文献

- [1] 尹积军. 支持特高压互联电网安全运行的供需友好互动技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5715-5723.
- [2] 马洲俊, 朱红, 徐青山. 计及源网荷运行特性的配电网中长期调度互动技术[J]. 现代电力, 2017, 34(4): 15-20.
- [3] 马小燕, 余高旺, 简立, 魏艳伟, 赵丹, 李磊. 基于无线通信的精准负荷控制系统[J]. 电器与能效管理技术, 2019, 0(14): 40-45.
- [4] 王明明, 赵磊, 卢福木, 高效海, 王一蒙, 邵淑燕, 王慧轩. 基于稳控技术的毫秒级精准负荷控制系统[J]. 供用电, 2018, 35(6): 53-59.
- [5] 陈庆, 闪鑫, 罗建裕, 戴则梅, 江叶峰, 王毅. 特高压直流故障下源网荷协调控制策略及应用[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 147-152.